

半导体器件中的噪声 及其低噪声化技术

庄奕斌 孙 青 编著



国防工业出版社

73.73
179

半导体器件中的噪声 及其低噪声化技术

庄奕琪 孙 青 编著

国防工业出版社

(京) 新登字106号

内 容 简 介

本书系统地介绍了半导体器件中各种噪声现象的理论及其应用技术。

全书共分七章。第一章阐述器件噪声分析所必备的一些基础知识。第二章至第五章分别叙述半导体器件中热噪声、散粒噪声、 $g-r$ 噪声和 $1/f$ 噪声的物理来源、理论模型和实验特性。第六章和第七章则介绍了实现半导体器件低噪声化的设计与工艺技术,以及噪声分析在器件质量表征和可靠性评估中的应用。

本书叙述深入浅出,理论联系实际,重点内容力求反映半导体器件噪声领域80年代以来的新进展。本书主要供从事半导体器件研究和研制工作,以及其它相关领域内的科研人员及工程技术人员阅读,也可作为理工科大学有关专业的研究生和高年级本科生的教学参考书。

半导体器件中的噪声及其低噪声化技术

庄奕琪 孙 青 编著

责任编辑 孙中明

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

北京市飞龙印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 印张 $7\frac{3}{8}$ 187千字

1993年10月第一版 1993年10月第一次印刷 印数: 0001—1000册

ISBN 7-118-01075-8/TN·175 定价: 8.70元

8400110

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖，内容明确、具体、有突出创见，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。
4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展评审工作，职责是：负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技

图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版，随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第一届评审委员会组成人员

主任委员：冯汝明

副主任委员：金朱德 太史瑞

委员：尤子平 朵英贤 刘琯德
(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫悟生

曾 铎

秘 书 长：刘琯德

前 言

电子系统的内部噪声是制约其性能、质量和可靠性的关键因素之一。在各类测试系统中，噪声的大小决定了系统的分辨率和可检测的最小信号幅度；在通信系统中，噪声的存在影响信号传输的保真度以及接收机的灵敏度；在数字与计算机系统中，噪声幅度随机变化形成的尖峰会引起误触发，产生伪信号。系统的噪声主要来自构成系统的电子元器件中的噪声，而半导体有源器件又在其中占有重要位置。在微弱信号检测、精密计量、红外探测、水下声频通信以及高保真音响等新技术领域中，低噪声半导体器件是必不可少的关键器件。更为重要的是，半导体器件噪声（尤其是低频噪声）的大小敏感地反映着器件内在质量和可靠性的优劣。因此，如何认识和掌握半导体器件中各种噪声的性质，从而设法减少或消除之，是一个非常重要的课题。

随着电子整机向着高度集成化和微系统化发展，半导体器件的噪声对于整机性能的影响也越来越突出。与之相适应，低噪声电子学的研究重点也逐渐从传统的分立线路的低噪声电子设计转向器件的低噪声物理，以及包括低噪声设计和低噪声工艺在内的低噪声化技术的研究。国外对于半导体器件噪声的研究大体上经历了三个阶段。第一个阶段是在 1970 年前后，广泛研究了各种噪声的形成机构以及和各种器件参数的关系；第二个阶段是从 70 年代中期至 80 年代中期，在对器件噪声特性作进一步深入了解的同时，研制开发了各种低噪声半导体器件，包括分立器件和集成电路；第三个阶段大约是从 1985 年开始，利用噪声（特别是低频噪声）作为器件微观性质研究、质量检测和可靠性评估的手段。截至目前，半导体器件中的噪声仍然是一个非常活跃的研究领域，尚待解决的问题仍然很多，每年有大量的学术论文发表。

在我国，无论是在半导体器件噪声的基础研究方面，还是在低噪声器件的研制方面，都十分薄弱。一个突出的表现是，至今国内还没有一本系统介绍半导体器件噪声问题的书籍，现行大专院校教材中与之有关的内容均过于简单，不能够反映近年来该领域的新发展。本书系统深入地阐述了半导体器件中各种噪声现象的物理来源、理论模型以及有关的实验规律，同时以较大篇幅介绍了实现半导体器件低噪声化的设计与工艺技术，以及噪声分析在质量表征和可靠性评估方面的应用。本书是根据国外有关文献及作者近年来的科研成果而写成的，重点内容力求反映 80 年代以来半导体器件噪声研究的新进展。

作者希望本书能够满足不同读者的需要，既可供从事半导体器件研究和研制工作以及其它相关领域内的科研人员及工程技术人员使用，也可作为理工科大学有关专业的研究生和高年级本科生的教学参考书。为此，在内容的安排上，既包含了一般的定性讲解，也包括深入的理论分析。由于噪声问题本身的复杂性，较严格的数学分析是必不可少的，但是我们在理论推导的过程中，在明确物理概念的前提下，力求做到简明扼要、深入浅出。限于篇幅，本书仅论及常规硅半导体器件，不涉及化合物半导体器件和特种半导体器件。

承蒙吉林工业大学戴逸松教授和南京电子器件研究所顾世惠研究员级高级工程师在百忙之中对本书全稿进行了仔细的审阅和指正，在此谨向他们表示诚挚的谢意。

由于作者水平所限，加之噪声领域本身的发展异常迅速，书中错误和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作 者 于西安电子科技大学

目 录

主要符号表	1
第一章 噪声基础	6
1.1 噪声的数学基础	6
1.1.1 概率密度函数与平均值	6
1.1.2 自相关函数与功率谱密度	8
1.1.3 噪声量的迭加与相关	10
1.2 器件噪声的表征参数	12
1.2.1 二端元器件噪声的表征	12
1.2.2 等效输入噪声	14
1.2.3 噪声系数	15
1.2.4 多级放大器的噪声	17
1.2.5 噪声带宽	19
1.3 半导体器件噪声的分类和特点	20
第二章 热噪声	24
2.1 热噪声模型	24
2.1.1 热噪声的完全表达式	25
2.1.2 扩散噪声	27
2.1.3 热电子噪声	29
2.2 场效应晶体管的热噪声	30
2.2.1 沟道热噪声基本公式	30
2.2.2 JFET 的沟道热噪声	33
2.2.3 MOSFET 的沟道热噪声	35
2.2.4 感应栅噪声	38
参考文献	39
第三章 散粒噪声	41
3.1 散粒噪声的基本特性	41
3.2 半导体二极管的散粒噪声	44
3.2.1 简单模型	44
3.2.2 高频模型	45
3.2.3 大注入模型	47

3.3 双极晶体管的散粒噪声	50
3.3.1 简单模型	50
3.3.2 高频模型	53
3.3.3 大注入模型	54
3.4 结型器件的其它散粒噪声	56
3.4.1 pn 结空间电荷区复合电流的散粒噪声	53
3.4.2 pn 结的雪崩噪声	57
参考文献	61
第四章 g-r 噪声	63
4.1 g-r 噪声的基本特性	68
4.2 JFET 的 g-r 噪声	67
4.2.1 栅结势垒区中陷阱中心产生的 g-r 噪声	67
4.2.2 沟道中的复合中心产生的 g-r 噪声	69
4.3 双极晶体管中的猝发噪声	71
4.3.1 猝发噪声的一般性质	71
4.3.2 猝发噪声的物理机构	74
4.4 小尺寸 MOSFET 中的随机电报噪声 (RTN)	76
参考文献	78
第五章 $1/f$ 噪声	80
5.1 概述	80
5.2 $1/f$ 噪声模型	84
5.2.1 表面载流子数涨落模型	84
5.2.2 迁移率涨落模型	90
5.2.3 量子 $1/f$ 噪声	94
5.3 双极晶体管的 $1/f$ 噪声	96
5.3.1 表面 $1/f$ 噪声	96
5.3.2 位错 $1/f$ 噪声	103
5.3.3 $1/f$ 噪声源的鉴别	104
5.3.4 量子 $1/f$ 噪声	108
5.4 场效应晶体管的 $1/f$ 噪声	111
5.4.1 MOSFET 的表面 $1/f$ 噪声	111
5.4.2 FET 的量子 $1/f$ 噪声	123
参考文献	125
第六章 半导体器件的低噪声化技术	129
6.1 实现半导体器件低噪声化的基本原则	129

X

6.1.1 双极晶体管的 E_n-I_n 模型	129
6.1.2 场效应晶体管的 E_n-I_n	132
6.1.3 二端元器件的噪声模型	133
6.1.4 实现低噪声化的基本原则	135
6.2 模拟集成电路线路的低噪声设计	136
6.2.1 差分输入级的噪声分析	137
6.2.2 复合管与单元电路的噪声分析	140
6.2.3 线路的低噪声设计原则	146
6.3 器件结构参数的低噪声设计	147
6.3.1 低噪声器件结构的选择	147
6.3.2 版图的低噪声设计	148
6.3.3 双极晶体管掺杂浓度分布的低噪声设计	151
6.4 低噪声工艺	155
6.4.1 低噪声扩散工艺	155
6.4.2 表面钝化工艺	159
6.4.3 完美晶体工艺	164
6.5 数字集成电路的噪声	166
参考文献	170
第七章 噪声分析在半导体器件质量表征和可靠性评估中的 应用	172
7.1 用 $1/f^\gamma$ 噪声表征金属薄膜互连的电迁移	172
7.2 用 $1/f^\gamma$ 噪声和 RTN 研究 Si-SiO ₂ 界面附近的氧化层陷阱	181
7.2.1 用 $1/f^\gamma$ 噪声测量确定氧化层陷阱密度的能量与空间分布	183
7.2.2 用 RTN 测量确定氧化层陷阱的深度和俘获截面	192
7.3 用 $g-r$ 噪声分析半导体材料与器件中的深能级杂质	196
7.3.1 理论	196
7.3.2 实验	199
7.4 $1/f$ 噪声与半导体器件参数漂移失效的相关性	206
7.4.1 $1/f$ 噪声与双极晶体管的 $\dot{h}_{FE}$ 漂移	207
7.4.2 $1/f$ 噪声与 MOSFET 的负温偏不稳定性	210
7.4.3 $1/f$ 噪声与电离辐照引起的 MOS 器件阈值电压漂移	215
7.4.4 $1/f$ 噪声与稳压二极管的基准电压退化	218
参考文献	221

6600149

主要符号表

a	晶格常数、JFET 冶金沟道半高度
A	面积
A_v	电压增益
b	JFET 中性沟道半高度
c	相关系数、光速
C_D	耗尽层电容
C_{gs}	栅源电容
C_{ox}	栅氧化层电容
C_{js}	快界面态电容
C_n	反型层电容
D	扩散系数
D_{it}	界面陷阱密度
D_n	电子扩散系数
D_p	空穴扩散系数
E	能量、电场强度
E_a	激活能
E_c	导带底能级、临界电场强度
E_F	费米能级
E_t	热噪声电压、陷阱能级
E_n	等效输入噪声电压
E_{ni}	等效输入噪声
E_v	价带顶能级
f	频率
f_t	电子占据陷阱能级的几率
f_T	特征频率

9410063

f_{β}	截止频率
F	噪声系数
F_{opt}	最佳噪声系数
g	电导、高频电导、简并度
g_c	低频电导
g_e	FET 沟道电导
g_{d0}	零漏源电压时的 FET 沟道电导
g_m	跨导
g_{mi}	饱和区跨导
G	功率增益
G_n	噪声电导
h	普朗克常数
$\hbar$	简约普朗克常数
h_{FE}	双极晶体管直流电流增益
I	电流
I_B	基极电流
I_C	收集极电流
I_D	漏源电流
I_{Dsat}	饱和漏源电流
I_{nq}	等效噪声电流
I_E	发射极电流
I_F	正向电流
I_n	等效输入噪声电流
I_K	反向电流
I_t	热噪声电流
j	电流密度
k	玻耳兹曼常数
L	长度、沟道长度
L_D	德拜长度
L_b	发射区周长

2000.10

L_n	电子扩散长度
L_p	空穴扩散长度
m^*	有效质量
m_n^*	电子有效质量
m_p^*	空穴有效质量
n	电子浓度
n_i	本征载流子浓度
N	载流子数目
N_A	受主掺杂浓度
N_D	施主掺杂浓度
N_F	(对数)噪声系数
N_{sub}	FET 衬底掺杂浓度
N_t	氧化层陷阱密度
p	概率密度、动量、空穴浓度
q	电子电量
$r_{bb'}$	基极电阻
R	电阻
R_n	噪声电阻
R_s	信号源电阻
$(R_s)_{opt}$	最佳源电阻
s	表面复合速度
s_0	基本表面复合速度
$S_{I_B}(f)$	双极晶体管等效输入噪声电流的功率谱密度
$S_{V_G}(f)$	FET 等效输入噪声电压的功率谱密度
$S_x(f)$	随机量 x 的功率谱密度
t	时间
t_{ox}	栅氧化层厚度
T	温度、时间周期
T_e	等效电子温度
T_n	噪声温度

x	坐标、氧化层陷阱分布深度
y	坐标、在 FET 中沿沟道方向从源指向漏
Y	导纳
Z	阻抗
U_i	表面复合率
v_a	电子漂移速度
v_{th}	载流子热运动速度
V	电压、电势差
V_{BS}	衬底偏压
V_{BB}	发射极-基极偏压
V_{CE}	基极-收集极偏压
V_{di}	p-n 结自建电势差
V_D	漏源电压
V_{DSat}	饱和区漏源电压
V_{FB}	平带电压
V_G	栅极电压
V_T	阈值电压
W	沟道宽度、发射区宽度
W_B	基区宽度
W_{BS}	基区表面宽度
W_n	n 区长度
W_p	p 区长度
α	共基极小信号电流放大系数、散射系数
α_0	共基极直流电流放大系数
α	胡格 (Hooge) 系数
β	共射极小信号电流放大系数
β_0	共射极直流电流放大系数
ϵ_0	二氧化硅的介电常数
ϵ_s	硅的介电常数
θ	隧道贯穿系数

μ	载流子迁移率
μ_n	电子迁移率
μ_p	空穴迁移率
μ_0	低电场迁移率
ρ	电阻率
σ	方差、俘获截面
τ	时间常数、寿命
τ_c	俘获时间常数
τ_e	发射时间常数
τ_n	电子寿命
τ_p	空穴寿命
φ	电势
φ_F	费米势
φ_s	表面势
ω	角频率
Δf	噪声带宽

第一章 噪声基础

本章阐述半导体器件噪声分析所必备的一些基础知识，主要介绍了噪声在时间域和频率域的数学分析方法和基本公式，给出了器件噪声各种表征参数的定义以及相互关系，并对半导体器件噪声的分类和特点作了概括性的介绍。

1.1 噪声的数学基础

噪声来源于物理量的随机起伏。随机起伏的物理量称为随机变量，记为 $x(t)$ ，其中 t 为时间。在任一瞬间不能预知随机变量的精确大小，但是大多数随机变量遵循一定的统计分布规律。随机变量的统计平均值恒为零，故多用均方值来表征其大小。

形成噪声的物理机构通常称为噪声源。如果噪声源的性质不随时间变化，那么表征该噪声源的随机变量的统计特性也不随时间变化。这种随机变量称为平稳随机变量。半导体器件中的噪声基本上都属于平稳随机变量。此外，若随机变量连续取值，则称为连续随机变量；若随机变量离散取值，则称为离散随机变量。

1.1.1 概率密度函数与平均值

对于连续随机变量 x ，设它在 x 与 $x+dx$ 之间取值的概率为

$$dP(x) = p(x)dx \quad (1.1)$$

则称 $p(x)$ 为 x 的概率密度函数，通常也简称为“几率分布”。对于平稳随机变量，在任一时刻 t ，均有 $p(x, t) = p(x)$ 。 $p(x)$ 应满足归一化条件，即

$$\int p(x)dx = 1 \quad (1.2)$$

积分范围应包含 x 的所有可能取值。